第42卷 第2期
2025年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 42 No. 2
Feb. 2025

新疆大气可降水量时空演变特征及其与降水转化关系

赵世康[1,2]， 穆振侠[1,2]， 李 刚[3]， 杨荣钦[1,2]， 黄娩婷[1,2]

（1. 新疆农业大学水利与土木工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052；3. 新疆伊犁州水利电力勘测设计研究院有限公司，新疆 伊宁 835100）

摘 要：大气可降水量（PWV）是表征大气中水汽含量的重要指示因子，明确PWV与降水的转化机制对水资源高效利用具有重要意义。本文以新疆为研究区，基于多源数据计算PWV，并以探空数据为参考，评估ERA5全球大气再分析数据计算PWV的优劣，借助降水转换率（PCE）揭示PWV与降水的转化关系。结果表明：（1）ERA5计算的PWV精度较高，与传统依托探空数据确定的PWV的相关系数和均方根误差分别为0.98和2.6 mm。（2）1960—2020年新疆PWV总体呈增加趋势，增幅为0.1 mm·(10a)$^{-1}$；小波频谱显示研究区PWV变化周期以短周期为主，分别为2.6 a、6 a。（3）从点尺度来看，PCE随站点降水量的增加而升高；从线尺度来看，PCE的变化规律在经度方向上呈"U"型，在纬度方向上大致呈"L"型；从面尺度来看，PCE的高值区主要分布在林地、坡度为25°~35°范围及海拔5000 m以上的区域，分别为7.17%、5.8%和5.1%；（4）降水丰枯异常典型年PCE差异明显，辐合强、水汽上升运动强烈的特丰水年，引起了较高的PCE，平、枯水年PCE较低。（5）北极涛动指数和太平洋十年振荡是影响全疆PCE的主要因素，由于不同区域间因气候和地形等因素的差异，PCE受控因子存在一定的差异。研究结果可为新疆地区空中水资源利用及降水转化评估提供理论参考。

关键词：可降水量；降水转换率；转换关系；新疆

降水量是评估区域气候变化的关键指标，对水资源利用、作物生长及生产生活具有重要影响[1]。水汽作为降水的前提条件[2]，其在大气中的分布和运动影响着降水的时空分布规律及其对气候变化的响应。水汽含量通常可用大气可降水量（PWV）来表示，能够反映水汽的丰富程度[3]。尽管水汽只占全球水资源的0.1%~3%，但却是大气中最活跃的成分[4]，对全球水循环和能量平衡均有重要的影响。PWV是水资源的潜在来源，充分利用PWV增加区域降水量不仅能缓解现阶段凸显的水资源供需矛盾，而且对地下水超采的缓解及脆弱生态环境的持续改善意义重大。因此，厘清PWV的变化规律对降水规律的明晰、自然灾害的预警、气候变化的应对等至关重要[5]，同时对空中云水资源潜力挖掘具有重要意义。

传统监测PWV的方法主要是依托探空数据进行确定[6]，其对单个站点的PWV计算精度较高，因此，常被用于评估其他方法的优劣。然而，探空站点存在分布稀疏且空间代表性差的弊端，难以满足大尺度、实时PWV监测的需求[7]。为克服探空数据的不足，有学者利用地面气象资料建立了一种新的计算PWV的方法[8]，由于气象站点数量明显多于探空站点，因此，其空间分辨率远高于探空站点，且地面气象资料计算的PWV精度与探空数据确定的PWV相差不大，该方法得到了一定的认可。但新疆这种地处干旱半干旱地区，实测站点稀少、分布不均且多布设在海拔较低的平原区，制约了对PWV规律的认识。近年来，随着科学技术的发展，大气再

收稿日期：2024-06-23； **修订日期：**2025-01-05
基金项目：国家自然科学基金项目（52269007）；新疆维吾尔自治区重点研发计划项目（2022B03024-4）；新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室实践创新项目（ZDSYS-YJS-2023-15）
作者简介：赵世康（1999-），男，硕士研究生，主要从事水文水资源研究. E-mail: 320222258@xjau.edu.cn
通讯作者：穆振侠. E-mail: xjmzx@xjau.edu.cn

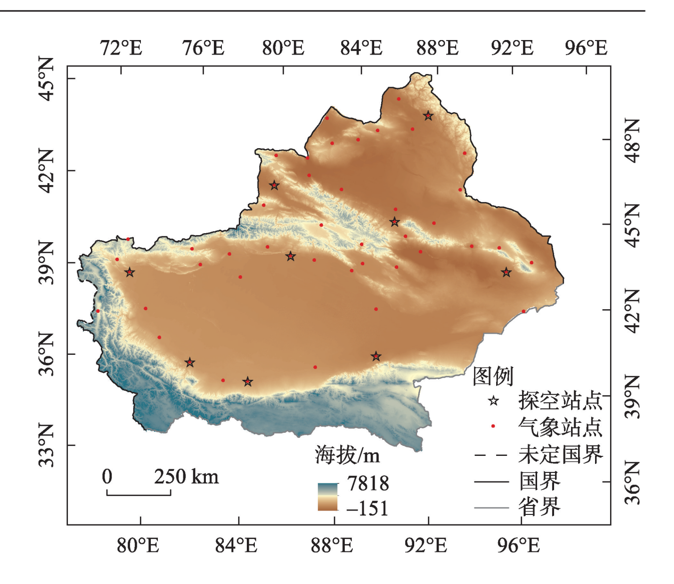
分析资料的日益丰富及其高时空分辨率的优点，已被广泛应用于PWV的研究中[9]。如Zhang等[10]评估了ERA5数据集对中国区域PWV计算的适用性，认为基于ERA5数据集计算PWV的方法是可行的，但其仅从大尺度证明了该数据集计算PWV的可行性，对于复杂地形和气候条件下，精细化的PWV评估仍需要进一步研究和探讨。

在过去的几十年里，西北干旱区气候发生了显著变化，逐渐由暖干向暖湿转变[11-12]。尽管PWV和降水呈明显增加趋势[13]，但由于所在区域温度的升高、蒸发量的增加，对可用水资源的增加作用有限，水资源短缺问题仍然存在[14]。为厘清PWV与降水之间的关系，有研究提出了降水转化率（PCE）的概念，将PWV与降水的关系从定性分析转为定量研究[15-16]，这对于较好地理解水循环过程、人工增雨、极端天气应对等具有重要的意义。李帅等[17]依托地面气象资料，分析了阿勒泰地区PCE的时空变化特征；周顺武等[18]基于探空站点数据和地面气象资料分析了青藏高原夏季PWV和PCE的空间分布特征，这些研究进一步明确了PCE变化规律。然而，目前的研究多采用实测站点数据进行分析，对点尺度的PCE有了较好的认识，受实测站布设密度与位置等综合影响，对于面尺度PCE的变化规律认识仍不明晰。尽管部分研究者已采用大气再分析资料及其他多源数据探讨了区域PCE的空间分布特征，但鉴于目前可用多源数据空间分辨率较粗糙的弊端[19]，对精细化区域PCE的评估带来了一定的局限性，限制了人们对PWV与降水转化机制的认识。同时，伴随着水资源供需矛盾的加剧，以空中云水资源潜力挖掘作为有效解决水资源短缺问题的途径之一，目前已成为研究的热点与难点，这些均与PCE明确相关。为此，本文以新疆为研究区，以探空数据计算的PWV为参考值，评估ERA5数据计算PWV的优劣性，并从点线面多尺度分析PWV与降水的转化机制，利用随机森林模型探讨大尺度气候因子对PCE的影响，为新疆水资源潜力挖掘、空中水资源利用等提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆位于我国西北边疆（图1），深居内陆，属于



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2023)2767号，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

典型的大陆性干旱气候，其总面积约为166×10⁴ km²，占全国陆地总面积的六分之一。新疆地形复杂，从北向南依次为阿尔泰山、准噶尔盆地、天山、塔里木盆地以及昆仑山，呈"三山夹两盆"的分布格局[20-21]。天山山脉将新疆分为北疆和南疆，形成了干旱区气候条件明显不同的山地-绿洲-沙漠系统[22]。由于新疆远离海洋，受水分来源限制，降水稀少且蒸发强烈，多年平均降水量约为157.7 mm左右，可用水资源缺乏且时空分布不均[23]。

1.2 数据来源

（1）探空数据。收集研究区可用的9个探空站2002—2020年不同等压面数据，时间分辨率为12 h。数据来源于中国气象数据网(https://data.cma.cn/)。

（2）气象站点数据。收集研究区可用的49个气象站月尺度降水数据，时间序列为1960—2020年，数据来源于中国气象数据网(https://data.cma.cn/)。

（3）ERA5再分析资料。收集欧洲中尺度天气预报中心(https://cds.climate.copernicus.eu/)发布的不同等压面（时间）ERA5再分析数据，时间序列为1960—2020年，水平分辨率为0.25°×0.25°。

（4）大尺度气候因子。收集美国国家海洋和大气管理局(https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/)发布的1960—2020年逐月气候因子数据集，包括大西洋多年代际振荡（AMO）、北极涛动指数（AOI）、北大西洋涛动（NAO）、厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）、

太平洋十年振荡(PDO)、太阳黑子。

(5) 土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/),空间分辨率为30 m×30 m。数字高程数据(DEM)来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/),空间分辨率为30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 PWV计算方法

(1) 探空资料计算PWV

利用探空仪测量的不同大气层数中的气象因子确定PWV,公式为:

$$w=\frac{1}{\rho g}\int_0^p q\mathrm{d}p \tag{1}$$

式中:w表示大气可降水量(mm);ρ表示液态水密度($\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$);g为重力加速度,取值为9.81;p表示各层气压(hPa);$q(p)$表示随气压变化的各层比湿($\mathrm{g\cdot kg^{-1}}$)。为方便计算,将式(1)进行离散化,从而得到从地面到大气顶层(p=0)的可降水量计算公式:

$$w=-\frac{1}{g}\sum_{p_{地}}^{0} q\mathrm{d}p \tag{2}$$

(2) 再分析资料计算PWV

考虑到ERA5再分析资料具有高时空分辨率的特点,可使用ERA5数据集中的气压和混合比湿要素计算PWV,公式为:

$$\mathrm{PWV}=\sum_{i}^{n-1}\frac{(q_i+q_{i+1})\times(p_{i+1}-p_i)}{2\rho_w g} \tag{3}$$

$$g=9.780325\times\left[\frac{1+0.00193185\times\sin(\varphi)^2}{1-0.00669435\times\sin(\varphi)^2}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中:PWV表示大气可降水量(mm);n表示总层数;q_i和p_i分别表示第i层混合比湿($\mathrm{kg\cdot kg^{-1}}$)和气压(hPa);ρ_w表示液态水密度($\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$);g表示随纬度变化而变化的重力加速度;φ表示纬度。

1.3.2 PCE计算方法 空气柱中可降水量仅仅表示降水的潜力,只有少部分能转化为实际降水[24]。不同地区降水转化的能力不同,PCE表示可降水量能够转为降水的比率,可大致衡量某地区、某时段内可降水量向降水转化效率的高低。本文基于实测站点降水数据和ERA5确定的PWV来计算PCE,具体计算公式可参考文献[25]。

1.3.3 驱动因子分析 PCE的大小受AMO、AOI、NAO、ENSO、PDO、太阳黑子等多种大尺度气候因子的共同影响。同时,这些气候因子的异常变化往往表现出更为复杂和多样化的特征,其对PCE的影响严重制约了人们对于PCE变化规律与驱动机制的认识。考虑到随机森林回归模型具有抗过拟合、处理多类型数据的优点,能够揭示多变量之间的复杂交互关系[26]。因此,本文利用随机森林回归模型量化各气候因子对PCE的相对贡献度,从而确定影响PCE的主要因素。

2 结果与分析

2.1 再分析资料PWV的精度评估

以探空站点为基准,采用双线性插值法将ERA5数据集插值到探空站点上。将探空站数据、ERA5数据计算的月尺度PWV分别记为RS-PWV、ERA5−PWV。由图2可以看出,ERA5−PWV与RS-PWV的变化趋势基本一致,均呈单峰型分布,但在量级上存在一定的差异。相较于探空站数据,ERA5数据计算的PWV在夏季误差较大,冬季较小。这可能是由于新疆地区夏季多雨、水汽变化剧烈,导致ERA5−PWV在夏季时出现较大的误差;而冬季漫长少雨,水汽变化平稳,因此,其模拟的PWV精度较高。为进一步评估ERA5−PWV的优劣性,分别借助相关系数r、均方根误差RMSE和平均绝对误差MAE对比了ERA5−PWV与RS-PWV的差异性。从表1可以看出,ERA5−PWV与RS-PWV的相关性较高,均达到了0.97以上;RMSE和MAE的差异也相对较小,平均分别为2.6 mm和2 mm。此外,不同站点间的PWV存在明显偏差,这可能是因为ERA5数据是基于数值天气预报模型生成的,其精度会受到输入数据质量及模型参数的影响,从而导致不同地区的PWV差异明显。总体而言,ERA5数据计算的PWV在新疆地区具有较高的精度和稳定性,能够较好地描述PWV的变化趋势。

2.2 PWV的时空变化

鉴于ERA5数据能够用于研究区PWV的评估,并在一定程度上可以弥补实测数据稀缺和空间分布不均的弊端。因此,本研究借助ERA5数据计算研究区的PWV,并分析其时空变化特征。从1960—2020年PWV的变化趋势(图3a)可以看出,研究区PWV总体呈增加趋势,增幅为0.1 $\mathrm{mm\cdot(10a)^{-1}}$。借助累计距平法发现,研究区PWV在1985年发生突变,1985年前呈不明显减少趋势,1985年后呈波动增加趋势,1985—2020年平均PWV相较于1985年前增

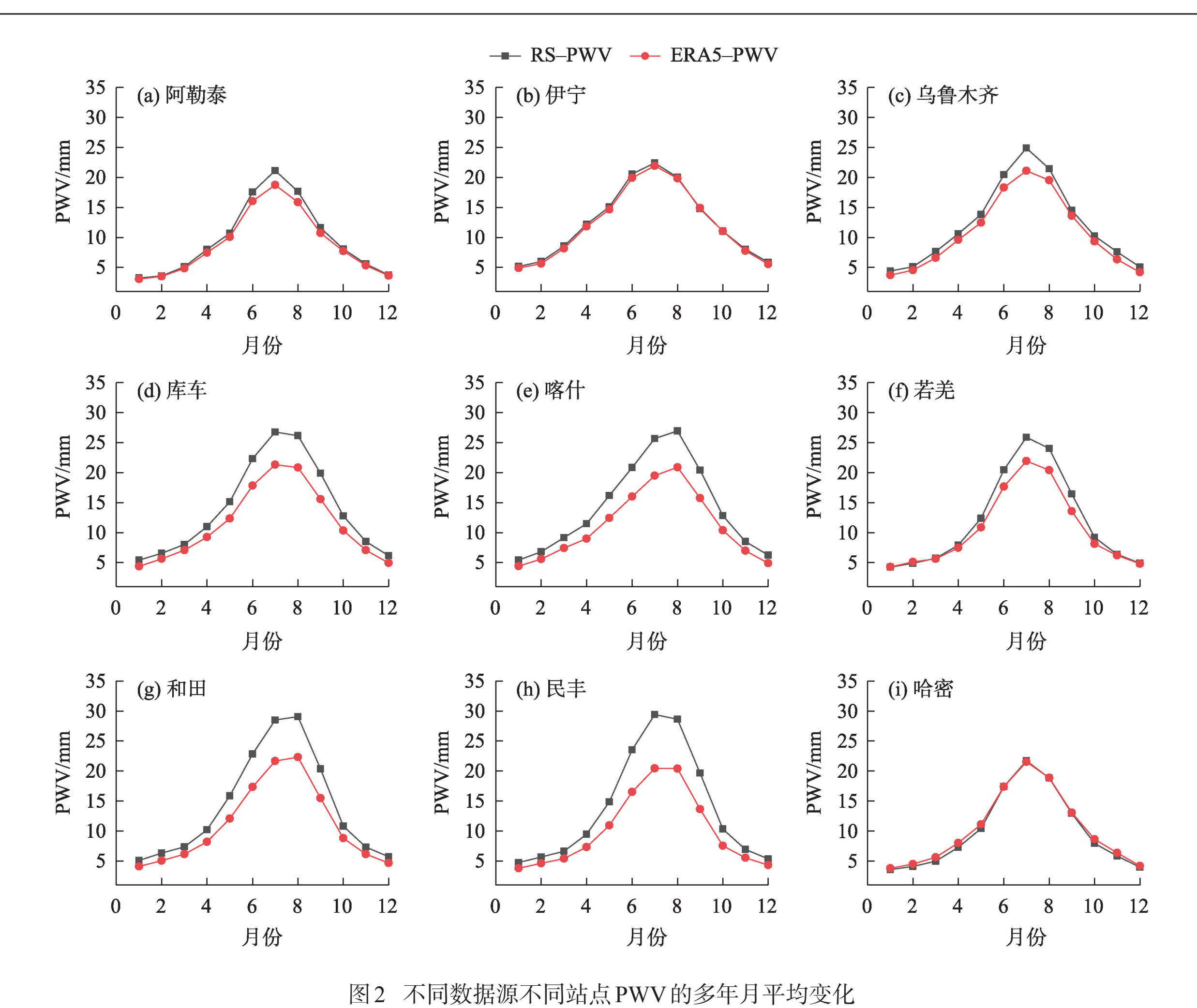


图2　不同数据源不同站点PWV的多年月平均变化

Fig. 2　Multi-year monthly average changes in PWV at different stations for different data sources

表1　2002—2020年不同数据源不同站点PWV的 r、RMSE及MAE

Tab. 1　The r, RMSE and MAE of PWV at different stations for different data sources from 2002 to 2020

站点	探空-ERA5		
	r	RMSE/mm	MAE/mm
阿勒泰	0.99	1.46	0.97
伊宁	0.97	1.30	1.00
乌鲁木齐	0.97	2.05	1.27
库车	0.99	3.10	2.54
喀什	0.99	3.74	3.12
若羌	0.99	2.16	1.52
和田	0.99	3.90	3.13
民丰	0.99	4.71	3.67
哈密	0.98	1.11	0.80
平均	0.98	2.60	2.00

加了4.7%。其整体变化规律与相关学者对新疆降水的研究规律的结论是一致的[27]。此外，20世纪80年代后，新疆地区气候开始由暖干向暖湿转变，这进一步证明了PWV与降水之间存在密切的联系。准确认识PWV的变化规律，对揭示区域水汽循环过程和合理开发利用空中水资源具有重要意义。借助连续小波变换法对PWV的周期性(图3b)分析可以看出，研究区近61 a间PWV的变化存在多重时间周期，其中1960—1990年间存在1~10 a、1~3 a、4~6 a的震荡周期；1993—2020年间存在连续性的1~7 a的显著周期。通过PWV的小波频谱可知，在95%的置信区间下(红色虚线内)，PWV的变化周期以短周期为主，分别为2.6 a、6 a，进一步表明在变化环境的影响下，研究区PWV变化的不确定性将增加、周期变化将更加频繁。

基于克里金插值法计算得到ERA5-PWV的空间变化规律(图4a)。从图中可以看出，研究区PWV的空间分布存在显著差异，总体呈平原向山区递减的趋势。PWV的高值区主要分布在降水稀

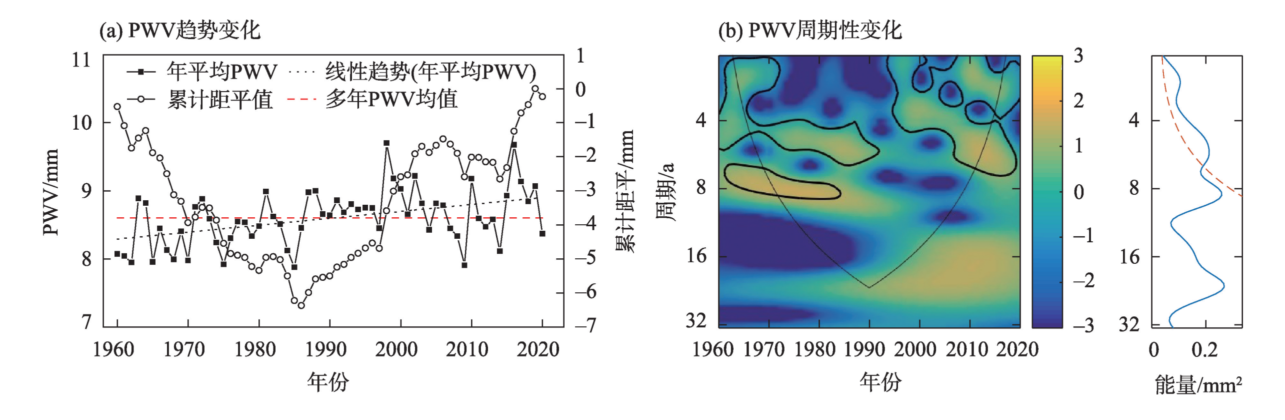
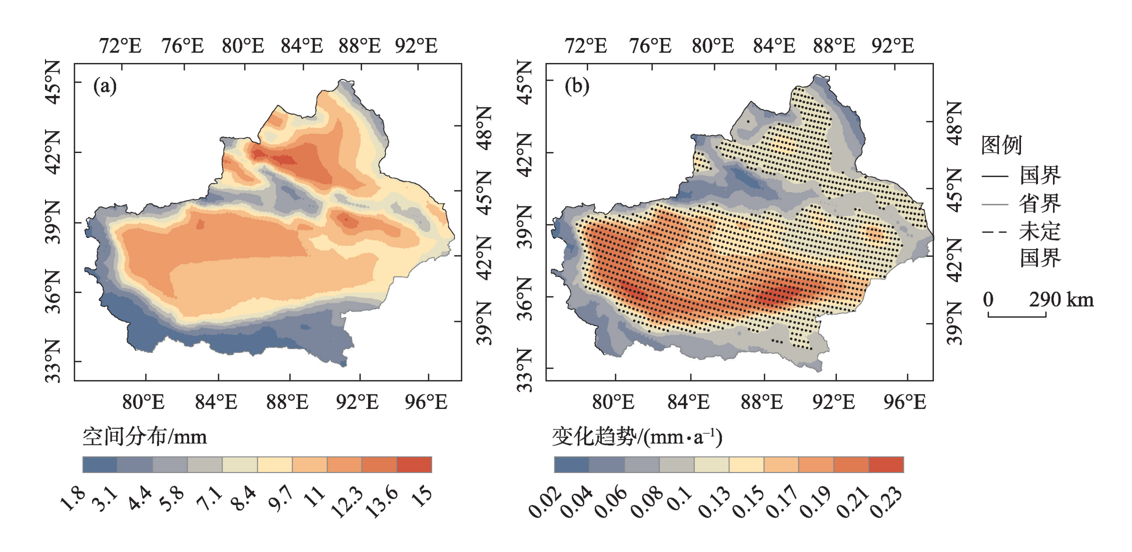


图3　新疆1960—2020年平均PWV的时间变化

Fig. 3　Temporal variation of mean PWV in Xinjiang from 1960 to 2020



注：图中黑色点表示通过0.05显著性检验区域。

图4　1960—2020年新疆PWV的空间分布(a)及变化趋势(b)

Fig. 4　Spatial distribution (a) and trend (b) of PWV in Xinjiang from 1960 to 2020

少、蒸发强烈的平原地区，而处于降水的高值区、径流主要形成区的山区则为低值区，并且北疆地区PWV普遍高于南疆地区。总体而言，海拔高度与PWV呈负相关，出现这一规律及特征的主要原因是新疆平原区多以盆地为主，而盆地地势低、空气柱长、厚度大，大气中的水汽又主要集中于对流层中下层，空中水汽较周边山区丰富。从1960—2020年PWV的空间变化趋势(图4b)可以看出，研究区PWV总体呈增加趋势，但空间差异性较明显。平原区呈显著增加趋势，其中增幅最大的区域主要出现在塔里木盆地，为0.15~0.23 mm·a^{-1}；而山区的PWV呈不明显增加趋势，增幅为0.02~0.06 mm·a^{-1}，且增加幅度在空间上表现为四周向区域中部逐渐增加的趋势。

2.3　PCE的变化特征

2.3.1　PCE的多尺度变化特征

（1）点尺度PCE变化规律

选用研究区可用的49个气象站点，采用双线性插值法将ERA5-PWV插值到对应站点，并结合实测降水数据计算逐月PCE。从点尺度分析可知，研究区整体PCE为0.31%~13.88%，平均为4.1%。以天山山脉为界，分析发现，天山南、北站点的PCE波动变化差异不大，天山以北站点的PCE要高于天山以南。具体而言，天山以北站点的PCE在1.64%~13.66%间波动变化，平均为6.05%；天山以南站点的PCE为0.54%~13.88%，平均为3.03%。尽管平原区的PWV要高于山区，但平原区的PCE要远低于山区所在区域。对降水极少的吐哈盆地所在区域的气

象站点分析发现，PCE为0.31%~8.61%，平均仅为2.26%。这也是造成该区域干旱和生态环境极其脆弱的重要原因。为更好地厘清降水量级与PCE之间的关系，对所选实测站点降水分析发现，研究区降水量在14.7~508.5 mm之间。因此，以50 mm为界，统计不同降水量级下的PCE，考虑到降水量>250 mm站点较少，因此，对降水量>250 mm的站点统一进行分析(图5)。结果显示，降水量在<50 mm、50~100 mm、100~150 mm、150~200 mm、200~250 mm、>250 mm站点所对应的平均PCE分别为0.78%、1.7%、3.02%、6.44%、7.87%和9.83%。PCE的变化与降水量的多少存在密切关系，PCE增大是导致降水增加的原因之一。考虑到选用气象站点海拔高度在37~3507 m之间，以500 m为界，分别统计不同高程带所在区域站点的PCE发现，PCE随海拔的升高呈现增加的趋势。具体在<500 m、500~1000 m、1000~1500 m、1500~2000 m、2000~2500 m、>3000 m区间站点的平均PCE分别为2.69%、3.95%、2.69%、6.68%、7.41%和9.37%。

(2) 面尺度PCE变化规律及其差异性

以ERA5-PWV与实测站点降水计算出的点尺度PCE数据为依据，借助协高程克里金插值法得到了研究区PCE在空间上的变化规律(图6)。整体上研究区PCE空间差异明显，表现为山区高于平原区，其中阿尔泰山、天山及昆仑山为典型的高值区，而塔里木盆地及吐哈盆地为典型的低值区。结合研究的土地利用数据统计分析发现(图7)，不同土

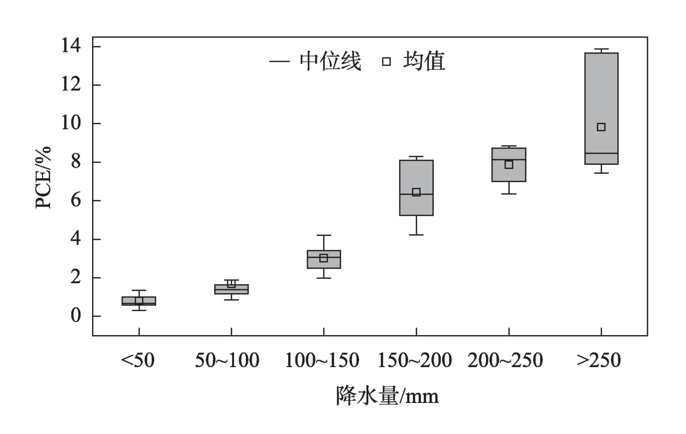


图5 不同降水量下的PCE箱线图

Fig. 5 Box line plot of PCE under different precipitation levels

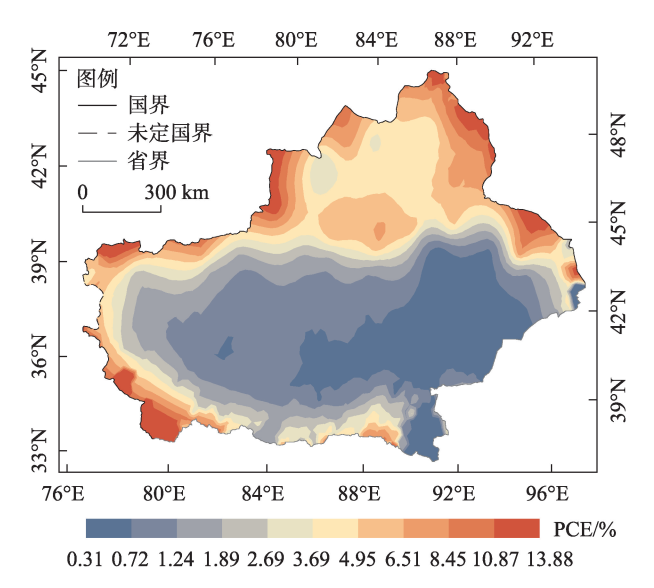


图6 PCE的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of PCE

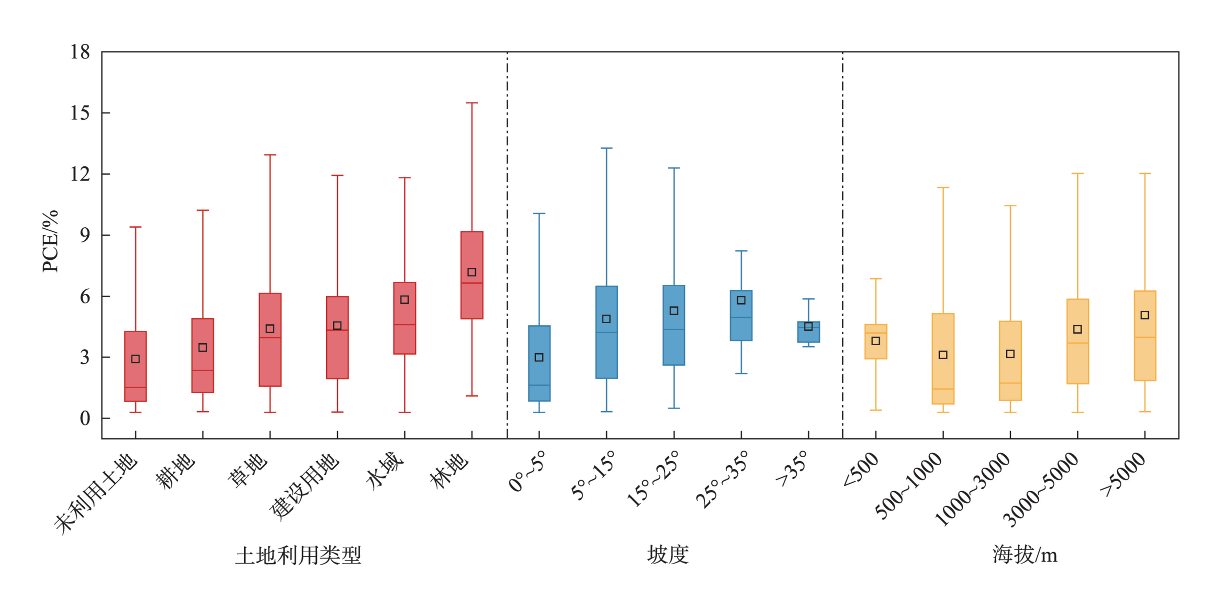


图7 不同土地利用类型、坡度、海拔下的PCE箱线图

Fig. 7 Boxplot of PCE under different land use types, slope and elevation

地利用类型下的PCE差异不大。具体而言，林地所在区域PCE最高，平均为7.17%；其次依次为水域、建设用地、草地、耕地、未利用土地所在区域，平均PCE分别为5.83%、4.55%、4.4%、3.5%、2.9%。此外，考虑到地形因子也是影响PCE的重要因素，因此，借助研究区DEM数据，从坡度与海拔的角度分析了PCE变化规律及差异性（图7）。从不同坡度等级统计分析发现，PCE随坡度的增加整体呈先增后减的趋势。具体而言，坡度在25°~35°范围内PCE最高，为5.79%；在0°~5°范围内PCE最低，为3%；而坡度在15°~25°、5°~15°和>35°以上区域时，平均PCE差异性不大，分别为5.28%、4.88%和4.5%。从不同海拔角度统计分析发现，PCE随海拔高度的增加表现为先减后增的趋势。具体而言，海拔高于5000 m以上所在区域PCE最高，平均为5.1%；而5000 m以下所在区域PCE的差异性不大，海拔为3000~5000 m、<500 m、1000~3000 m、500~1000 m所在区域的平均PCE分别为4.4%、3.79%、3.16%、3.11%。

（3）线尺度PCE变化规律

为明确PCE在经纬度方向上变化规律的差异性，以面尺度PCE数据（图6）为依据。综合考虑水汽来源方向、天山山脉的阻挡及水汽输送过程中的能量损耗等因素，并考虑篇幅的局限性，选取以天山南北坡纬度线39°N和45°N、水汽强弱的经度线81°E和88°E为典型剖面，探究PCE变化规律（图8）。总体来看，无论是沿经度还是纬度方向，PCE变化规律与地势的波动起伏变化规律是一致的，即随海拔高度的升（降）而增（减），且地势的波动越剧烈其变化更敏感。具体而言，在经度方向上PCE变化规律呈“U”型，且越靠近水汽来源方向，即水汽越丰富，U型越明显；在纬度方向上自西向东PCE变化规律呈“L”型，天山以北PCE高于以南地区，且受复杂地形波动的影响变化更加剧烈。尽管在经纬度方向上PCE变化规律与地形的波动变化一致，但在局部高、低海拔区域，PCE的变化与地形起伏呈相反规律。这可能是因为PCE变化规律不仅与地势的起伏变化有关，还与水汽的强弱、风向、风速、地表覆被等因素有关，还有待进一步分析研究。

2.3.2　不同典型年PWV与降水转化机制　借助研究区实测降水资料，分别选取特丰水年（P=5%）、平水年（P=50%）、特枯水年（P=95%）作为典型年，探究极端年份PWV与降水转化规律的差异性。统计不同典型年平均PCE分别为5.22%、4.28%和3.28%。通过对比典型年研究区的水汽含量、水汽通量及水汽通量散度可以看出（表2），特丰水年的水汽含量及水汽通量较其他典型年明显偏高，而较高的水汽含量和水汽通量为其提供了充足的水汽条件，从而有利于水汽向降水转换。通过对能够反映水汽辐合辐散情况的水汽通量散度对比发现，特丰水年水汽通量散度明显偏低，表明该年为强辐合年，水汽

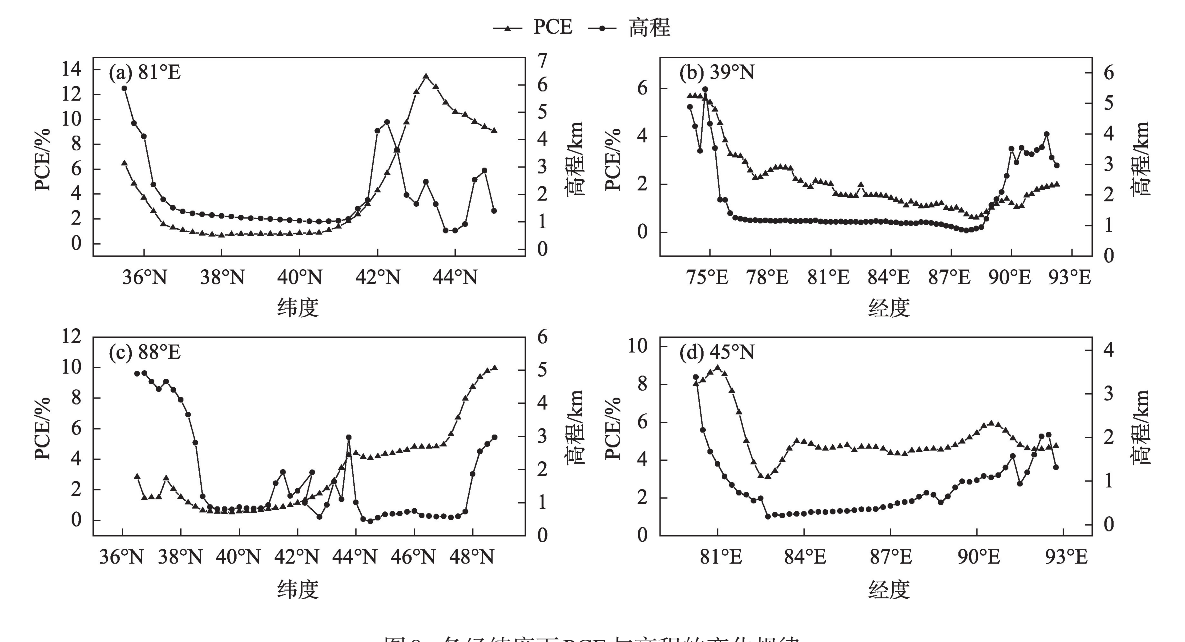


图8　各经纬度下PCE与高程的变化规律

Fig. 8　Changing pattern of PCE and elevation at various latitudes and longitudes

表2　不同典型年下水汽含量、水汽通量及水汽通量散度分布

Tab. 2　Distribution of water vapor content, water vapor flux and water vapor flux dispersion under different typical years

	水汽含量/mm	水汽通量/(kg·m^{-1}·s^{-1})	水汽通量散度/10^{-6} s^{-1}
特丰水年	3288.1	40.8	-0.15
平水年	2977.8	38.9	-0.01
特枯水年	2900.6	33.6	-0.03

的上升运动增强，有助于降水的生成，使得PCE较高；而平水年和特枯水年水汽通量散度均较高，为弱辐合年，表明水汽聚集能力较弱，不利于降水的生成，使得PCE较低。综合来看，充足的水汽条件以及较强的水汽辐合是导致不同典型年PCE差异的主要原因。

2.3.3　大尺度气候因子对PCE的影响分析　为更好地明晰PCE的驱动因素，本研究基于随机森林模型，分析了AMO、AOI、NAO、ENSO、PDO、太阳黑子等大尺度气候因子与PCE的响应关系。综合考虑新疆的降水时空分布规律、地形等特点，分别对全疆、北疆、南疆和三大典型流域(额尔齐斯河流域、塔里木河流域、伊犁河流域)作为研究对象，探究了各气候因子对PCE的贡献度(图9)。从全疆来看，AOI和PDO对PCE的相对贡献度较高，分别为22.2%和25.7%，其他气候因子对PCE的影响较低，这表明AOI和PDO是影响全疆PCE的主要因素。从不同区域来看，南疆PCE主要受AMO、ENSO和PDO的影响，其相对贡献度分别为27.4%、25.3%和24.3%；而北疆除太阳黑子对PCE无影响以外，其他气候因子贡献度均较高，其中PDO最高为23%。从不同流域来看，伊犁河流域PCE主要受ENSO控制，其相对贡献度达32.2%，其次是太阳黑子，为21.3%；塔里木河流域PCE同样受ENSO的影响，相对贡献度达32.1%，其次是AMO，为25.7%；而额尔齐斯河流域PCE则主要受AOI的控制，相对贡献度高达41.4%，其他气候因子对PCE的贡献度较低。

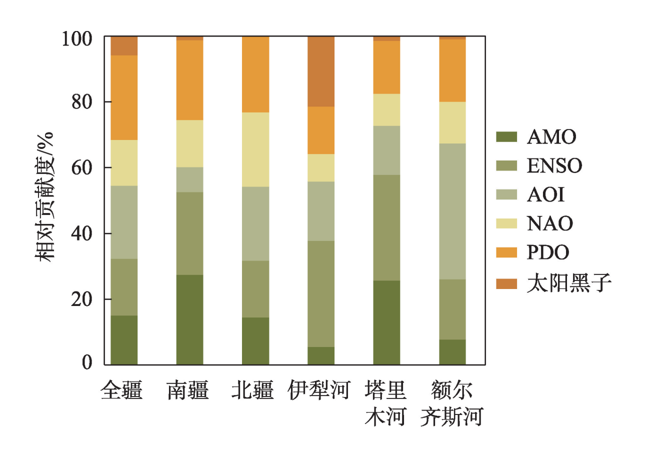


图9　大尺度气候因子对PCE的相对贡献度

Fig. 9　Relative contribution of large-scale climate factors to PCE

综上所述，不同区域间由于地形和气候条件的差异性，导致PCE受控于不同的气候因子。在以往的研究中，AOI和PDO被认为是影响西北干旱区干湿变化的重要因素[28-29]。如贾艳青等[30]研究表明，在PDO暖相位时，西北、东北和青藏高原地区降水偏多；从靖等[31]研究发现，干旱半干旱区降水多年代际变化主要受PDO调制，尤其在新疆北部及内蒙古东北部，降水年代际变化与PDO呈显著正相关。这与本文的研究结果相符合。从不同流域来看，ENSO是影响伊犁河流域和塔里木河流域PCE变化的主控因素，ENSO事件发生时，海表面温度异常变化可能会通过影响大气环流系统[32]，进而影响到这些流域的降水变化；额尔齐斯河流域的PCE则主要受AOI的影响，这可能与AOI对北半球中高纬度地区气候的影响有关。该研究可为新疆气候变化的诱因及影响等方面的研究提供一定的支撑。

3　结　论

本文以RS-PWV为参考值，评估ERA5-PWV的精度和适用性，并对PWV的时空变化趋势进行分析，通过计算PCE，揭示PWV与降水的转化机制，基于随机森林模型探讨了不同区域PCE与大尺度气候因子的潜在关系。主要结论如下：

(1) ERA5-PWV与RS-PWV的平均相关系数和RMSE分别为0.98、2.6 mm。ERA5数据计算的PWV在新疆地区具有较高的精度和稳定性。

(2) 时间上，1960—2020年新疆地区PWV总体呈增加趋势，突变点发生在1985年；小波频率谱显示研究区年PWV以短周期为主，分别为2.6 a、6 a。空间上，PWV及其变化趋势随海拔高度的增加而减少。

(3) 从点尺度来看，PCE随站点降水量的增加而升高。从面尺度来看，在不同土地利用类型下，PCE的高值区主要分布在林地和水域；坡度在35°以下的区域PCE随坡度的增加而增加；海拔在1000 m

以上的区域PCE随海拔上升而增加。从线尺度来看,PCE在经度方向上的变化规律呈“U”型,在纬度方向上呈“L”型。

（4）水汽含量、水汽通量及水汽通量散度是引起不同典型年PCE差异的主要原因。特丰水年具有充足的水汽条件及较强的水汽辐合,因此,特丰水年PCE明显高于其他典型年。

（5）AOI和PDO是影响全疆PCE的主要因素,伊犁河流域和塔里木河流域PCE主要受PDO控制,额尔齐斯河PCE则主要受AOI的影响,其相对贡献度高达41.4%。

参考文献(References):

[1] 王朋, 石玉立. 青海地区TRMM 3B43降水产品融合降尺度与时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(7): 1136−1146. [Wang Peng, Shi Yuli. Fused-downscaling framework and spatiotemporal characteristics of TRMM 3B43 precipitation product in the Qinghai region[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(7): 1136−1146.]

[2] 潘锋, 何大明, 曹杰, 等. 夏季怒江流域水汽输送多支特征及对降水影响[J]. 地理学报, 2023, 78(1): 87−100. [Pan Feng, He Daming, Cao Jie, et al. Multiple branches of water vapor transport over the Nujiang River Basin in summer and its impact on precipitation[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(1): 87−100.]

[3] 马新平, 尚可政, 李佳耘, 等. 1981—2010年中国西北地区东部大气可降水量的时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 448−455. [Ma Xinping, Shang Kezheng, Li Jiayun, et al. Spatial and temporal changes of atmospheric precipitable water in the eastern part of Northwest China from 1981 to 2010[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 448−455.]

[4] 刘蕊, 杨青, 王敏仲. 再分析资料与经验关系计算的新疆地区大气水汽含量比较分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 77−85. [Liu Rui, Yang Qing, Wang Minzhong. Intercomparison and analysis of the result about atmospheric precipitable water caculated by NCEP reanalysis and empirical formula[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(4): 77−85.]

[5] 强安丰, 魏加华, 解宏伟, 等. 三江源区大气水汽含量时空特征及其转化变化[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 14−23. [Qiang Anfeng, Wei Jiahua, Xie Hongwei, et al. Spatial-temporal characteristics and changes of atmospheric water vapor in the Three River Headwaters region[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 14−23.]

[6] 杨红梅, 葛润生, 徐宝祥. 用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量[J]. 气象, 1998, 24(9): 9−12. [Yang Hongmei, Ge Runsheng, Xu Baoxiang. Analysis of total water vapor in tropospheric gas column using single station sounding data[J]. Meteorology, 1998, 24(9): 9−12.]

[7] Alshawaf F, Fuhrmann T, Knopfler A, et al. Accurate estimation of atmospheric water vapor using GNSS observations and surface meteorological data[J]. Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(7): 3764−3771.

[8] 杨景梅, 邱金桓. 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式[J]. 大气科学, 1996, 20(5): 620−626. [Yang Jingmei, Qiu Jinhuan. The empirical expression of the relation between precipitable water and ground water vapor pressure for some areas in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1996, 20(5): 620−626.]

[9] Wang Z, Chen P, Wang R, et al. Performance of ERA5 data in retrieving precipitable water vapor over Hong Kong[J]. Advances in Space Research, 2023, 71(10): 4055−4071.

[10] Zhang W, Zhang H, Liang H, et al. On the suitability of ERA5 in hourly GPS precipitable water vapor retrieval over China[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93: 1897−1909.

[11] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152−164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152−164.]

[12] 董翰林, 王文婷, 谢云, 等. 新疆气候干湿变化特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 1875−1884. [Dong Hanlin, Wang Wenting, Xie Yun, et al. Climate dry-wet conditions, changes, and their driving factors in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 1875−1884.]

[13] Tian J, Zhang Z, Zhao T, et al. Warmer and wetter climate induced by the continual increase in atmospheric temperature and precipitable water vapor over the arid and semi-arid regions of Northwest China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 42: 101151.

[14] 张玉欣, 马学谦, 韩辉邦, 等. 2014—2018年青海省云水资源时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1254−1262. [Zhang Yuxin, Ma Xueqian, Han Huibang, et al. Analysis of spatial and temporal distribution characteristics of cloud water resources in Qinghai Province from 2014 to 2018[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1254−1262.]

[15] 李进, 李栋梁, 张杰. 黄河流域夏季有效降水转化率[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 346−354. [Li Jin, Li Dongliang, Zhang Jie. Research on summer effective precipitation conversion rate over the Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 346−354.]

[16] 王娜, 顾伟宗, 邱粲, 等. 山东夏季空中水汽分布和水汽输送特征[J]. 高原气象, 2021, 40(1): 159−168. [Wang Na, Gu Weizong, Qiu Can, et al. Characteristics of atmospheric water vapor distribution and transport during summer over Shandong Province[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(1): 159−168.]

[17] 李帅, 谢国辉, 何清, 等. 阿勒泰地区降水量、可降水量及降水转化率分析[J]. 冰川冻土, 2008, 30(4): 675−680. [Li Shuai, Xie Guohui, He Qing, et al. Research on precipitation, precipitable water and the precipitation conversion efficiency of Altay Prefecture[J].

Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(4): 675-680.]
[18] 周顺武, 吴萍, 王传辉, 等. 青藏高原夏季上空水汽含量演变特征及其与降水的关系[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1466-1478. [Zhou Shunwu, Wu Ping, Wang Chuanhui, et al. Spatial distribution of atmospheric water vapor and its relationship with precipitation in summer over the Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(11): 1466-1478.]
[19] 范雪薇, 刘海隆, 赵文宇, 等. 基于NCEP资料新疆降水转化率的研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2016, 34(3): 372-378. [Fan Xuewei, Liu Hailong, Zhao Wenyu, et al. Analysis of precipitation conversion in Xinjiang based on NCEP data[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2016, 34(3): 372-378.]
[20] 许超杰, 窦燕, 孟琪琳. 基于EMD-GWO-LSTM模型的新疆标准化降水蒸散指数预测方法研究[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 527-539. [Xu Chaojie, Dou Yan, Meng Qilin. Prediction of the standardized precipitation evapotranspiration index in the Xinjiang region using the EMD-GWO-LSTM model[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 527-539.]
[21] 虞佳陆, 张景, 张敏, 等. 基于标准化前期降水蒸散指数的新疆干旱时空演变特征[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 275-288. [Yu Jialu, Zhang Jing, Zhang Min, et al. SAPEI-Based spatial and temporal variation characteristics of drought in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(4): 275-288.]
[22] Zhang R, Yuan Y, Gou X, et al. Tree-ring-based moisture variability in western Tianshan Mountains since A.D. 1882 and its possible driving mechanism[J]. Agricultural Forest Meteorology, 2016, 218: 267-276.
[23] He B, Chang J, Wang Y, et al. Spatio-temporal evolution and non-stationary characteristics of meteorological drought in inland arid areas[J]. Ecological Indicators, 2021, 126: 107644.
[24] 赵玲, 安沙舟, 杨莲梅, 等. 1976—2007年乌鲁木齐可降水量及其降水转化率[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3): 433-437. [Zhao Ling, An Shazhou, Yang Lianmei, et al. Study on precipitable water and precipitation conversion efficiency in Urumqi during the period of 1976-2007[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(3): 433-437.]
[25] 李霞, 张广兴. 天山可降水量和降水转化率的研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 33-37. [Li Xia, Zhang Guangxin. Research on precipitable water and precipitation conversion efficiency around Tianshan Mountain Area[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(5): 33-37.]
[26] Wang Q, Wang X, Zhou Y, et al. The dominant factors and influence of urban characteristics on land surface temperature using random forest algorithm[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 79: 103722.
[27] 姚俊强. 新疆空中水资源和地表水资源变化特征研究[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 181-190. [Yao Junqiang. Change in atmospheric and surface water resource in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(2): 181-190.]
[28] 王鹏祥, 何金海, 郑有飞, 等. 夏季北极涛动与西北夏季干湿特征的年代际关系[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 883-889. [Wang Pengxiang, He Jinhai, Zheng Youfei, et al. Inter-decadal relationships between summer Arctic Oscillation and aridity-wetness feature in Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(5): 883-889.]
[29] Ma Z. The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North China and their relationship to the Pacific Decadal Oscillation (PDO)[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(15): 2130-2139.
[30] 贾艳青, 张勃. 近57年中国北方气候干湿变化及与太平洋年代际振荡的关系[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1085-1097. [Jia Yanqing, Zhang Bo. Relationship of dry-wet climate changes in Northern China in the past 57 years with Pacific Decadal Oscillation (PDO)[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(5): 1085-1097.]
[31] 从靖, 赵天保, 马玉霞. 中国北方干旱半干旱区降水的多年代际变化特征及其与太平洋年代际振荡的关系[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(6): 643-657. [Cong Jing, Zhao Tianbao, Ma Yuxia. Multi-decadal variability of precipitation in arid and semi-arid region of Northern China and its relationship with Pacific Decadal Oscillation index[J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(6): 643-657.]
[32] Liu K, Xu K, Zhu C, et al. Diversity of marine heatwaves in the South China sea regulated by ENSO phase[J]. Journal of Climate, 2022, 35(2): 877-893.

Spatial and temporal evolution characteristics of atmospheric precipitable water vapor in Xinjiang and its relationship with precipitation conversion

ZHAO Shikang[1,2], MU Zhenxia[1,2], LI Gang[3], YANG Rongqin[1,2], HUANG Mianting[1,2]

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Yili State Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Yining 835100, Xinjiang, China)

Abstract: Atmospheric Precipitable Water Vapor (PWV) is an important indicator to characterize the water vapor content in the atmosphere, and clarifying the conversion mechanism between PWV and precipitation is of great significance for efficient water resource utilization. This paper takes Xinjiang as the study area, calculates PWV based on multi-source data, and evaluates the advantages and disadvantages of ERA5 global atmospheric reanalysis data for calculating PWV using radiosounde data as reference, and reveals the conversion relationship between PWV and precipitation with the help of Precipitation Conversion Efficient (PCE). The results show that (1) The PWV calculated by ERA5 has a high accuracy, with correlation coefficients and root mean square errors of 0.98 and 2.6 mm, respectively, compared to the PWV determined by traditional radiosounde data dependent methods. (2) Overall increasing trend of PWV in Xinjiang from 1960−2020, with an increase of 0.1 mm·$(10a)^{-1}$; the wavelet spectrum shows that the period of PWV change in the study area is dominated by the short period, which is 2.6 a and 6 a, respectively. (3) From a point perspective, PCE increases with increasing precipitation at the station. From a line perspective, the pattern of change in PCE is “U” type in the direction of longitude and roughly “L” type in the direction of latitude. At the surface scale, the high value areas of PCE were mainly distributed in the forested land, the slope range of 25°−35° and the area above 5000 m above sea level, which were 7.17%, 5.8% and 5.1%, respectively. (4) Typical years of precipitation abundance anomalies vary significantly in PCE, with exceptionally abundant years with strong convergence and strong upward movement of water vapor giving rise to higher PCE, and flat and dry water years with lower PCE. (5) Arctic Oscillation Index and Pacific Decadal Oscillation are the main factors affecting the PCE in the whole of Xinjiang, and there are some differences in the PCE controlled factors among different regions due to differences in climate and topography. The results of the study can provide theoretical references for airborne water resource utilisation and precipitation conversion assessment in Xinjiang.

Keywords: precipitable water vapor; precipitation conversion efficient; conversion relationship; Xinjiang